# Technical Note

Public Works Canada | Travaux publics Canada

Solar Programs Office (613) 996-9817

No. 25: September 1984

**Solar Energy Contribution of DHW Package Systems: Simulation Predictions Versus Test Results**

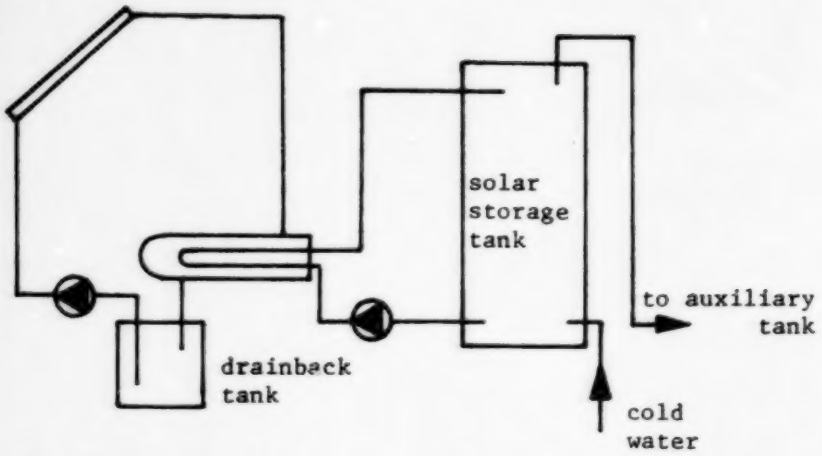
## 1. SYNOPSIS

The thermal performance of a number of generic solar DHW package systems was tested by the National Research Council in 1983 (ref. 1,2). The results of the controlled tests are compared with computer-simulated energy predictions based on system design data. The cumulative error for the measured data is within ±4% (ref. 3, 4, 5); the deviation between measured and predicted solar energy contribution was found to be in the order of ±11%. The careful selection of computer system models and the adjustment of simulation program parameters can increase the accuracy of simulated energy predictions.

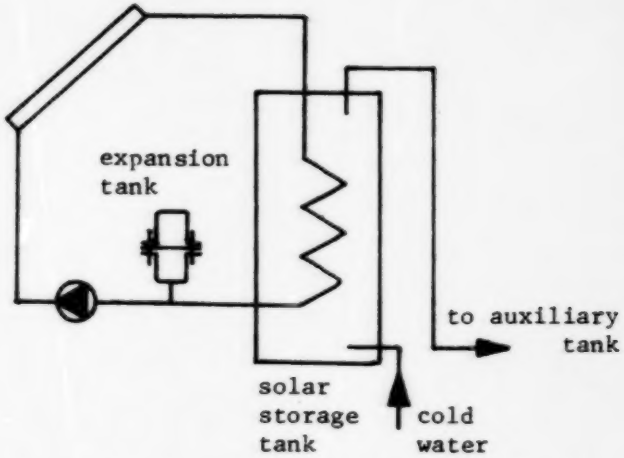
## 2. INTRODUCTION

The information discussed in this technical note applies primarily to solar domestic hot water packages. The four system types under discussion are shown in Figure 1. They are distinguished primarily by the type of heat exchanger they use.

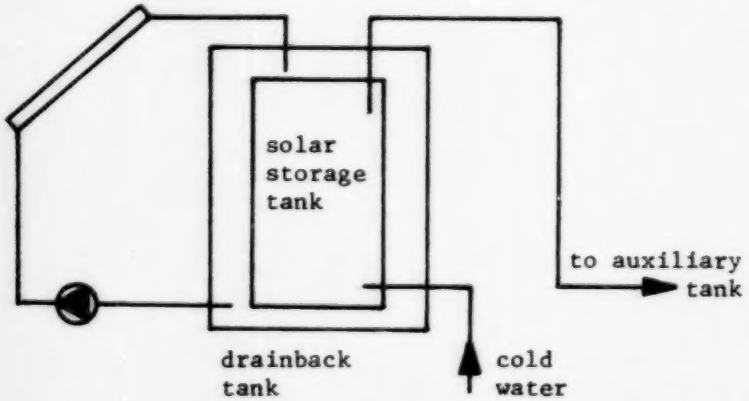
| System | Heat Exchanger |
|---|---|
| 1 | Tube-and-shell, collector-side |
| 2 | Immersed-coil, collector-side |
| 3 | Tank-in-tank, load-side |
| 4 | Immersed-coil, load-side |



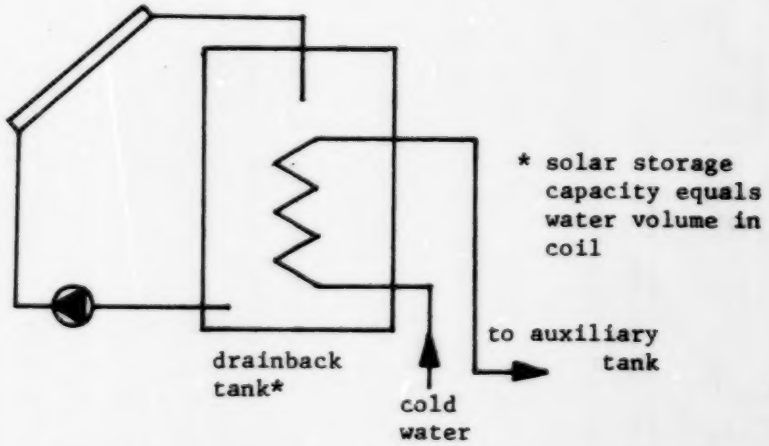

System 1 (Tube-and-Shell Heat Exchanger)




System 2 (Immersed-Coil Collector-Side Heat Exchanger)




System 3 (Tank-in-Tank Heat Exchanger)




System 4 (Immersed-Coil Load-Side Heat Exchanger)

Figure 1: Four Generic Types of DHW Packages Tested

The test data are compared with predicted energy values generated using the DHWA module of the WATSUN 6.1 computer simulation program. Factors such as collector array efficiency, on/off controller temperature settings and system thermal capacity are not taken into consideration in predicting solar energy contribution due to the current limitations of the computer program. These limitations create an unavoidable discrepancy between measured and predicted results.

In this note, system parameters including the storage tank heat loss coefficient, pump power, collector flow rate and heat exchanger effectiveness are calculated and adjusted to design conditions in order to accurately determine the degree of deviation between measured and predicted results.

## 3. SIMULATION INPUT PARAMETERS

For both the controlled tests and the simulations a load of 225 L/d was used and the load profile was selected according to CSA standards (ref. 6). Similarly, the maximum solar storage tank temperature was limited to 65°C. The WATSUN DHWA module has a lower limit on storage capacity of 30 $L/m^2$ of collector area. This limit was met by the systems tested.

Most computer simulation parameters were calculated from the manufacturers' supplied data. Other parameters were modified or derived as outlined in the following sections.

### 3.1 Weather Data

While the test period for the systems was February 1983 to January 1984, the WATSUN program uses 1970 weather data. Therefore, for each month in the test period, the simulated output energy was adjusted according to the ratio of the monthly solar radiation data for the two years (see Table 1). Since the systems operate at about a 40% solar energy contribution, the relationship between system thermal performance and incident radiation is approximately linear.

**TABLE 1**

**Monthly Solar Radiation on a Horizontal Surface**

| Month | 1983 ($MJ/m^2$) | 1970 ($MJ/m^2$) | Ratio |
|---|---|---|---|
| February | 258.4 | 282 | 0.92 |
| March | 379.8 | 420 | 0.90 |
| April | 390.9 | 498 | 0.79 |
| May | 480.2 | 628 | 0.76 |
| June | 679.2 | 620 | 1.10 |
| July | 661.2 | 653 | 1.01 |
| August | 557.9 | 577 | 0.97 |
| September | 400.7 | 402 | 1.00 |
| October | 265.7 | 266 | 1.00 |
| November | 112.7 | 148 | 0.76 |
| December | 123.7 | 140 | 0.88 |
| January (1984) | 153.3 | 168 | 0.91 |

### 3.2 Collector Parameters

Collector testing was performed at the National Solar Test Facility, and collector input parameters for the WATSUN program are based on these test results. The collector flow rates were calculated using pump flow/pressure curves (ref. 7). The pump energy input data was provided by the pump manufacturer. Parameters such as collector slope and orientation were based on the actual test installations.

### 3.3 Solar and Auxiliary Tanks

Actual tank dimensions and insulation thickness were used to calculate the heat loss coefficients of the solar and auxiliary tanks. The simulation results showed an average auxiliary tank loss of 15-16% of the gross solar energy collected annually.

### 3.4 Domestic Hot Water Load

The four systems were tested at a load of 225 L/d. Draws were made on the hour at a constant flow rate of 10 L/min to a maximum hourly draw of 45 L, according to the CSA standard load profile (ref. 6). The computer simulation, however, assumes that water draws occur instantaneously at the end of each hour. This may increase the deviation between measured and predicted energy data.

The auxiliary tank set temperature used in all simulations was 60°C. The cold water temperature was obtained from the maximum and minimum ground temperatures for the City of Ottawa, 15.7°C and 1.4°C respectively. The simulation program assumes a sinusoidal temperature swing between these limits, with the minimum mains temperature occuring at the beginning of March.

### 3.5 Pipe Heat Losses

The program input parameters for pipe heat losses were calculated from the length and surface area of the piping to and from the collectors and the thickness of the pipe insulation. In the simulations the average pipe heat losses amounted to 10-11% of the gross energy collected annually.

### 3.6 Heat Exchangers

Three thermodynamic models are built into the WATSUN 6.1 program. These were used to simulate the performance of the four generic system types.

In the simulations, the thermal performance of the tube-and-shell, collector-side heat exchanger was represented by its effectiveness. But since heat exchanger performance varies according to water temperature and flow rate, this assumption introduces an error in predicted energy. The mathematical model of this heat exchanger could be modified to reduce this error.

The immersed-coil, collector-side heat exchanger is represented by two parameters: coil length and coil height (ref. 8). This type of heat exchanger operates at a constant flow determined by the collector pump.

The tank-in-tank heat exchanger also operates at a constant flow rate and is represented by three parameters:

* internal tank volume ($m^3$)
* internal tank height
* overall heat transfer coefficient of the internal tank walls (W/m.°C).

This system was simulated using a tank-in-tank model developed by NRC. This model will soon be available through the WATSUN User Service Office.

The immersed-coil, load-side heat exchanger does not operate at a constant flow. Since the draw schedule used in the controlled tests varied from 5 to 45 L/h, and since the WATSUN module does not allow for a variable flow rate, two computer runs were made, one at a low and the other at a high flow rate. These runs were averaged on a monthly basis.

## 4. RESULTS

The results of the controlled testing and the computer simulations are illustrated in Figure 2; the percentage difference between energy predictions and measured test values are shown in Table 2. Systems 2, 3 and 4 were tested during the 12-month period from February 1983 to January 1984. Test results for System 1 are based on eight months of operation as system data are not available for February to May 1983. From the table it is seen that the deviation between predicted energy based on the manufacturers' design data and the test results is within $\pm$11%.

**TABLE 2**
**A Comparison of Measured and Predicted Energy**

| System Type | Collector Parameters | | | No. Days Operated | Net Measured Energy (GJ) | Net Predicted Energy (GJ) | % Difference $\left(\frac{\text{Pred-Meas}}{\text{Measured}}\right)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Total Area ($m^2$) | $F_R\overline{(\tau\alpha)}$ | $F_RU_L$ (W/°C.$m^2$) | | | | |
| 1 | 5.76 | 0.676 | 4.22 | 240 | 5.43 | 4.86 | -11 |
| 2 | 5.70 | 0.667 | 3.81 | 343 | 7.47 | 7.89 | 6 |
| 3 | 5.24 | 0.670 | 4.07 | 356 | 7.87 | 7.55 | -4 |
| 4 | 5.24 | 0.670 | 4.07 | 328 | 5.98 | 5.61* | -6 |

* averaged between high and low simulation runs.

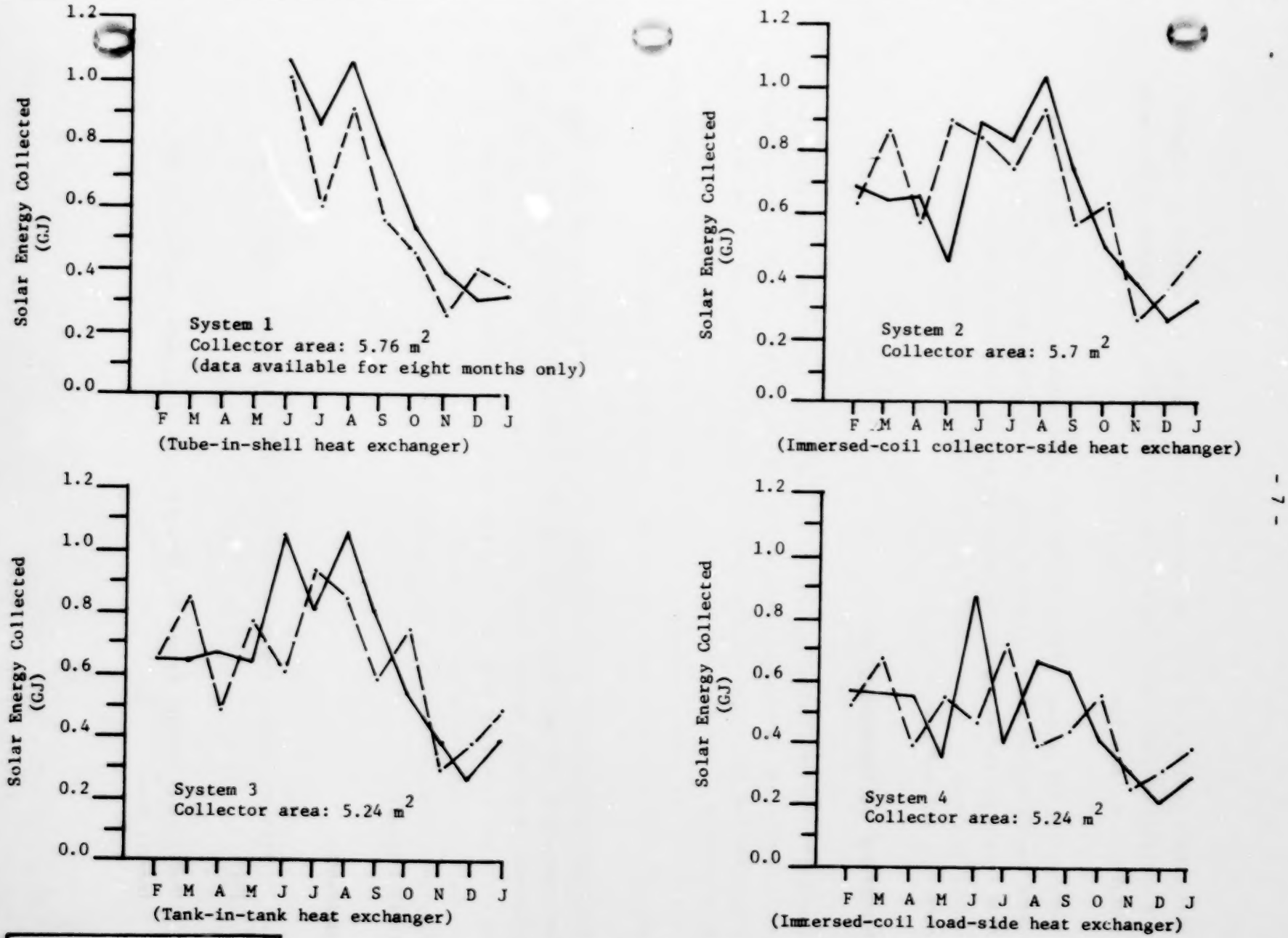



Figure 2: Measured vs. Predicted Monthly Solar Energy Contribution for February 1983 to January 1984

Under EMR's residential solar DHW demonstration program, the thermal performance of all approved manufacturers' products has been simulated. At present, solar energy contributions range from 7.5 to 12 GJ/a.

Although the DHW packages tested by NRC are representative of the generic types under consideration, their collector areas are relatively small -- approximately five square metres, as opposed to installed system sizes of 6 to 10 $m^2$. The energy delivered by these packages does not represent the annual performance of currently marketed DHW systems.

## 5. DISCUSSION AND RECOMMENDATIONS

The WATSUN program simulations compare well with the controlled test results, and until further improvements are made to the simulation tool, a $\pm$11% deviation between simulation and controlled testing results is considered acceptable. The deviation is attributed to the fact that the simulations do not take into account the thermal capacity of the system components, the threshold of operation of the collectors and the differences between design parameters and operating conditions.

When using computer aids for predicting solar energy contribution, the selection of the simulation program and model is very important. Also, the adjustment of component parameters to meet field conditions, e.g. the use of a correction factor to alter the flow rate (ref. 8), improves the accuracy of energy predictions. Consultation with the WATSUN User Service, Enermodal Engineering and the Solar Programs Office can be very useful, especially when designing large solar installations.

## 6. REFERENCES

1. "Performance Summary Report No. C462-P1", TES Ltd., under contract to NRC, July 1983.

2. "Performance Summary Report No. C462-P2", TES Ltd., under contract to NRC, January 1984.

3. "Analysis of Solar Domestic Hot Water System Performance", Enermodal Engineering Ltd., under contract to NRC, draft, November 1983.

4. Doeblin, Ernest O., "Measurement Systems: Application and Design", McGraw-Hill Book Co., New York, NY, 1966.

5. "Report No. 83SYS0807-SS", Section 2.3, DSET Laboratories Inc., Phoenix, AZ, August 25, 1983.

6. "Solar Domestic Hot Water Systems Liquid-to-Liquid Heat Transfer" F379-M 1982, Canadian Standards Association, ISSN 0317-5669, August 1982.

7. "Calculation of a Flow Rate and Fluid Property Correction Factor for Collector Performance Curves", Technical Note No. 3, Solar Programs Office, Public Works Canada, June 1982.

8. "WATSUN User's Manual" and program documentation, WATSUN 6.0, WATSUN User Service, Waterloo, Ont., June 1984.

# Guide technique

Travaux publics Canada | Public Works Canada

Bureau des programmes solaires (613) 996-9917

N° 25: septembre 1984

**Contribution solaire de chauffe-eau préfabriqués pour maisons: comparaison des études de simulation et des résultats d'essais**

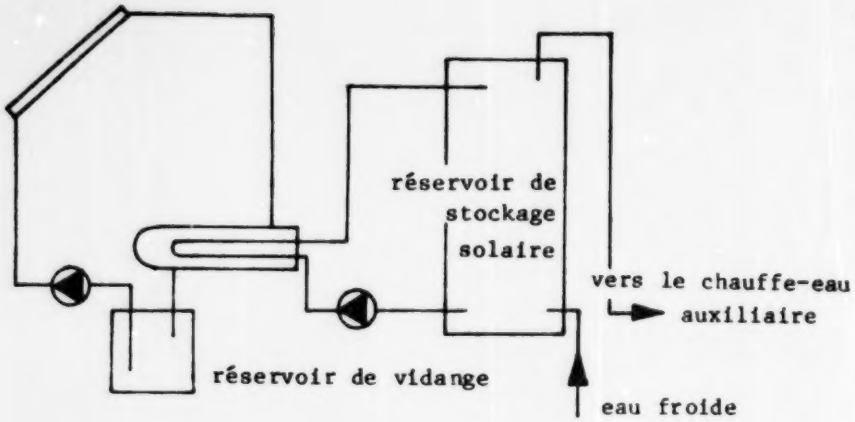
## 1. RÉSUMÉ

Le rendement thermique d'un certain nombre de chauffe-eau solaires a été déterminé par le Conseil national de recherches lors d'essais en 1983 (réf. 1 et 2). Les résultats de ces essais sont comparés aux prévisions d'apport énergétiques obtenues par simulation sur ordinateur à partir des données de conception des installations. L'erreur cumulative pour les données quantifiées se situe à ± 4% (réf. 3, 4 et 5); l'écart entre la contribution solaire mesurée et prévue est de l'ordre de ± 11%. Un modèle informatisé choisi avec soin et des modifications aux paramètres du programme de prévision peuvent accroître la précision des prévisions obtenues par simulation.

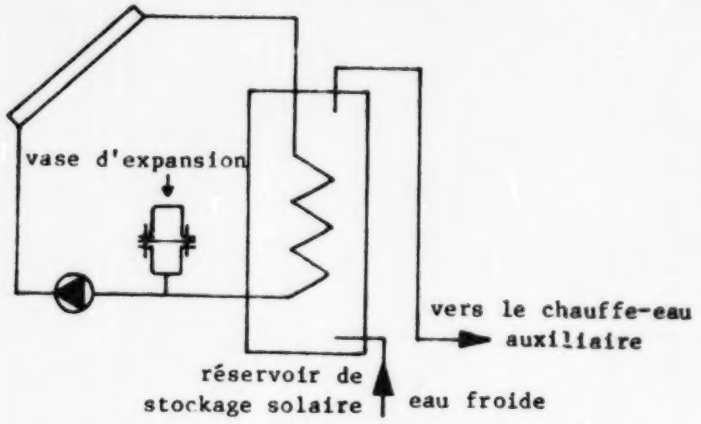
## 2. INTRODUCTION

Les renseignements fournis dans le présent document s'appliquent principalement aux chauffe-eau solaires préfabriqués pour maisons. Les quatre types d'installations étudiés sont illustrés à la figure 1. Ils diffèrent principalement par le type d'échangeur de chaleur utilisé.

| Installation | Échangeur de chaleur |
|---|---|
| 1 | A calandre, sur le circuit de captage |
| 2 | Serpentin immergé, sur le circuit de captage |
| 3 | Réservoir immergé |
| 4 | Serpentin immergé, sur le circuit d'eau potable |

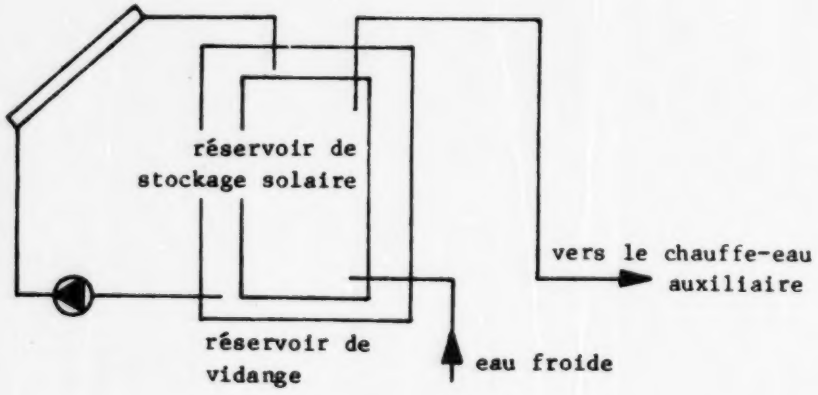



Système 1 (Échangeur de chaleur à calandre)

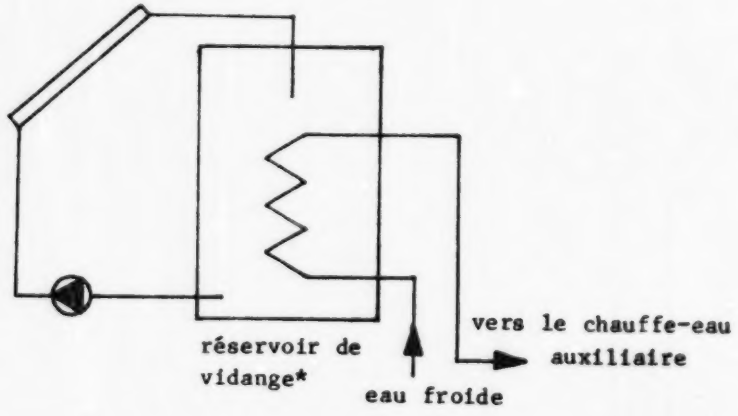



Système 2 (Échangeur de chaleur à serpentin immergé sur le circuit de captage)






Système 3 (Échangeur de chaleur à réservoir immergé)




Système 4 (Échangeur de chaleur à serpentin immergé sur le circuit d'eau potable)

Figure 1: Quatre types de chauffe-eau solaires préfabriqués mis à l'essai

*la capacité de stockage solaire est égale au volume d'eau dans le serpentin

Les résultats d'essai sont comparés aux valeurs de contribution énergétique prévues à l'aide du module DHWA du programme de simulation informatisée WATSUN 6.1. Des facteurs tels que le rendement des batteries de capteurs, les températures de consigne du contrôleur marche-arrêt et la capacité thermique des installations ne sont pas pris en compte dans la prévision de la contribution solaire en raison des limites actuelles du programme informatisé, ce qui crée un écart entre les résultats mesurés et les prévisions.

## 3. PARAMÈTRES DE SIMULATION

Pour les essais tout comme pour les simulations, on a utilisé un débit de consommation de 225 L/d avec un profil de répartition choisi conformément à la norme ACNOR (réf. 6). La température à l'intérieur du réservoir de stockage solaire a été limitée à 65°C. Le module DHWA de WATSUN a une limite inférieure de capacité de stockage de 30 L par $m^2$ de surface de capteurs. Tous les chauffe-eau mis à l'essai respectaient cette limite.

La plupart des paramètres de simulation ont été calculés à partir des données fournies par les fabricants. D'autres paramètres ont été modifiés ou dérivés comme le décrit les sections qui suivent.

### 3.1 Données météorologiques

Les essais des chauffe-eau se sont échelonnés de février 1983 à janvier 1984, mais le programme WATSUN utilise les données météo de 1970. Il a donc fallu, pour chaque mois de la période d'essai, corriger la quantité simulée d'énergie captée en la multipliant par le rapport de rayonnement solaire mensuel des deux années (voir le tableau 1). Puisque le soleil fournit à peu près 40% de l'énergie nécessaire au chauffage de l'eau, le rapport entre le rendement thermique du chauffe-eau et le rayonnement incident est à peu près constant.

**TABLEAU 1**

**Rayonnement solaire mensuel sur une surface horizontale**

| Mois | 1983 ($MJ/m^2$) | 1970 ($MJ/m^2$) | Rapport |
|---|---|---|---|
| Février | 258.4 | 282 | 0.92 |
| Mars | 379.8 | 420 | 0.90 |
| Avril | 390.9 | 498 | 0.79 |
| Mao | 480.2 | 628 | 0.76 |
| Juin | 679.2 | 620 | 1.10 |
| Juillet | 661.2 | 653 | 1.01 |
| Août | 557.9 | 577 | 0.97 |
| Septembre | 400.7 | 402 | 1.00 |
| Octobre | 265.7 | 266 | 1.00 |
| Novembre | 112.7 | 148 | 0.76 |
| Décembre | 123.7 | 140 | 0.88 |
| Janvier (1984) | 153.3 | 168 | 0.91 |

### 3.2 Paramètres relatifs aux capteurs

L'essai des capteurs s'est fait au Centre national d'essais d'équipements solaires et les paramètres relatifs aux capteurs qui ont été incorporés au programme WATSUN sont basés sur ces essais. Le débit à l'intérieur des capteurs a été calculé à partir des courbes débit-pression des pompes (réf. 7). Les chiffres de consommation des pompes ont été fournis par le fabricant. Les paramètres tels que l'inclinaison et l'orientation des capteurs ont été fondés sur les installations d'essai réelles.

### 3.3 Réservoir solaire et chauffe-eau auxiliaire

Les dimensions des réservoirs et l'épaisseur d'isolant réelles ont été utilisées pour calculer les coefficients de perte thermique des réservoirs. Les résultats de simulation indiquent qu'une perte moyenne de 15 à 16% de l'énergie solaire brute captée annuellement se produit par le chauffe-eau auxiliaire.

### 3.4 Consommation d'eau chaude sanitaire

Les quatre chauffe-eau ont été mis à l'essai à une consommation de 225 L/d. Des prélèvements étaient faits à une heure d'intervalle, à un débit constant de 10 L/mn jusqu'à un volume de prélèvement horaire maximal de 45 L, conformément au profil de consommation de la norme ACNOR (réf. 6). Toutefois, dans le cas de la simulation, le prélèvement se fait instantanément à la fin de chaque heure, ce qui peut augmenter l'écart entre les données d'essai et les prédictions.

Dans toutes les simulations, le chauffe-eau auxiliaire était réglé à 60°C. La température de l'eau froide a été établie à partir des températures maximale et minimale du sol à Ottawa, c.-à-d. 15.7 et 1.4°C respectivement. Le programme de simulation fait varier la température de façon sinusoidale entre ces deux limites et atteint la température minimale dans les conduites principales au début de mars.

### 3.5 Pertes de chaleur par les tuyaux

Les paramètres du programme relatifs aux pertes de chaleur par les tuyaux ont été calculés à partir de la longueur et de la surface des tuyauteries d'alimentation et de retour des capteurs ainsi que de l'épaisseur d'isolant des tuyaux. Dans les simulations, les pertes de chaleur moyennes par la tuyauterie représentaient de 10 à 11% de l'énergie solaire brute captée annuellement.

### 3.6 Échangeurs de chaleur

Trois modèles thermodynamiques ont été incorporés au programme WATSUN 6.1. Ils ont été utilisés pour simuler le rendement des quatre types de chauffe-eau.

Dans les simulations, le rendement de l'échangeur de chaleur à calandre sur le circuit de captage a été représenté par son efficacité thermique. Malheureusement, étant donné que le rendement d'un échangeur de chaleur varie en fonction de la température et du débit de l'eau, cette hypothèse introduit une erreur dans la prévision de l'énergie produite. Le modèle mathématique de cet échangeur de chaleur pourrait être modifié pour réduire cette erreur.

L'échangeur de chaleur à serpentin immergé sur le circuit de captage est représenté par deux paramètres: la hauteur et la longueur du serpentin (réf. 8). Ce type d'échangeur de chaleur fonctionne à un débit constant déterminé par la pompe des capteurs.

L'échangeur de chaleur à réservoir immergé fonctionne aussi à débit constant et est représenté par les trois paramètres suivants:

* le volume du réservoir intérieur (en $m^3$)
* la hauteur du réservoir intérieur
* le facteur de transmission thermique global des parois du réservoir intérieur (en W/m.°C).

Ce système a été simulé à l'aide d'un modèle "à réservoir immergé" élaboré par le CNRC. Ce modèle sera bientôt disponible par l'intermédiaire du service aux clients de WATSUN.

L'échangeur de chaleur à serpentin immergé sur le circuit d'eau potable ne fonctionne pas à un débit constant. Puisque les prélèvements lors des essais variaient entre 5 et 45 L/h, et puisque le module WATSUN ne prévoit pas la variation du débit, il a fallu faire deux simulations informatisées, l'une à faible débit, l'autre à un débit élevé. La moyenne des résultats obtenus a été établie pour chaque mois.

## 4. RÉSULTATS

Les résultats des essais sous surveillance et des simulations informatisées sont illustrés à la figure 2. Les pourcentages de différence entre les prévisions et les résultats d'essai sont donnés au tableau 2. Les systèmes 2, 3 et 4 ont été mis à l'essai pendant 12 mois, de février 1983 à janvier 1984. Les résultats d'essai pour le système 1 sont basés sur huit mois de service puisqu'on ne dispose pas de données sur ce système pour les mois de février à mai 1983. Le tableau 2 indique que l'écart entre l'énergie prévue à partir des données des fabricants et les résultats d'essais est de $\pm$ 11%.

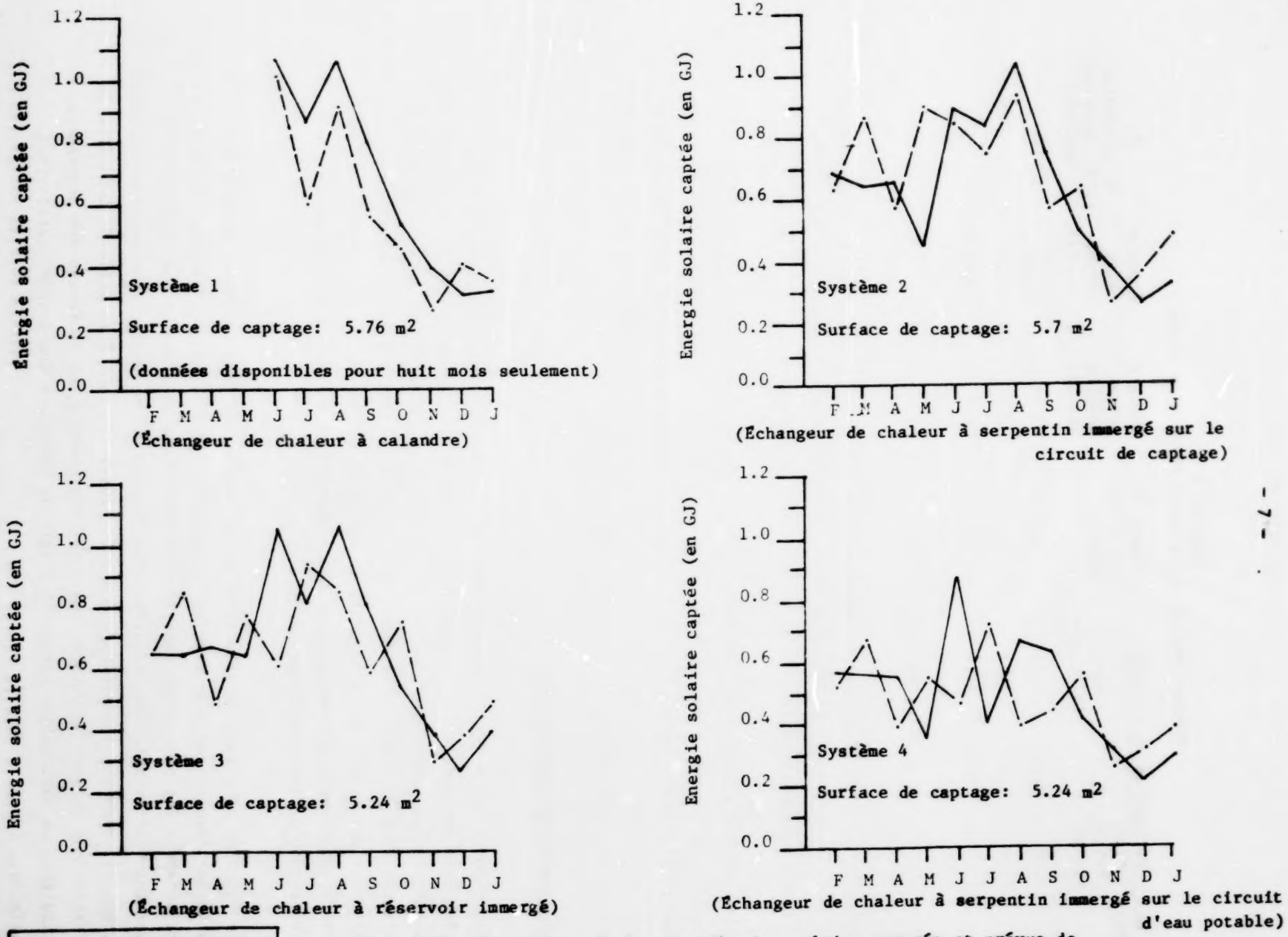



Figure 2: Comparaison de la contribution solaire mesurée et prévue de février 1983 à janvier 1984

**TABLEAU 2**
**Comparaison de l'énergie prévue et mesurée**

| Type de Système | Paramètres de captage: Surface globale (en $m^2$) | $F_R\tau\alpha$ | $F_RU_L$ ($W/^\circ C.m^2$) | Nombre de jours de service | Énergie nette mesurée (en GJ) | Énergie nette prévue (en GJ) | % de différence $\left(\frac{\text{prév.-mesures}}{\text{mesures}}\right)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5.76 | 0.676 | 4.22 | 240 | 5.43 | 4.86 | -11 |
| 2 | 5.70 | 0.667 | 3.81 | 343 | 7.47 | 7.89 | 6 |
| 3 | 5.24 | 0.670 | 4.07 | 356 | 7.87 | 7.55 | -4 |
| 4 | 5.24 | 0.670 | 4.07 | 328 | 5.98 | 5.61* | -6 |

* moyenne entre les simulations à faible et à haut débit

Dans le cadre du programme de démonstration des chauffe-eau solaires résidentiels d'EMR, le rendement thermique de tous les produits des fabricants a été simulé. A l'heure actuelle, la contribution solaire se situe entre 7.5 et 12 GJ/a.

Bien que les chauffe-eau préfabriqués mis à l'essai par le CNRC soient représentatifs des types généraux étudiés, leur surface de captage est relativement petite (environ cinq mètres carrés, comparativement à 6 à 10 $m^2$ pour les chauffe-eau installés). L'énergie fournie par ces ensembles ne représente pas le rendement annuel des chauffe-eau actuellement commercialisés.

## 5. ANALYSE ET RECOMMANDATIONS

Les simulations à l'aide du programme WATSUN se comparent avantageusement aux résultats des essais et un écart de $\pm$ 11% entre les prévisions et les résultats des essais semble acceptable jusqu'à ce que d'autres améliorations soient apportées à l'outil de simulation. Cet écart est attribué au fait que les simulations ne tiennent pas compte de la capacité thermique des éléments du chauffe-eau, du seuil de fonctionnement des capteurs ni de la différence entre les paramètres de conception et les conditions réelles de service.

Le choix du programme de simulation et du modèle est très important lorsqu'on utilise l'ordinateur pour prédire la contribution énergétique solaire. De plus, le rajustement des paramètres constitutifs pour mieux représenter les conditions en service (par exemple l'utilisation d'un facteur de correction pour modifier le débit (réf. 8)) augmente l'exactitude des prévisions. Il peut être utile de consulter le service aux clients de WATSUN, Enermodel Engineering, et le Bureau des programmes solaires, en particulier lorsqu'il s'agit de concevoir une grande installation solaire.

## 6. REFERENCES


1. "Performance Summary Report No. C462-P1", TES Ltd., under contract to NRC, July 1983.

2. "Performance Summary Report No. C462-P2", TES Ltd., under contract to NRC, January 1984.

3. "Analysis of Solar Domestic Hot Water System Performance", Enermodal Engineering Ltd., under contract to NRC, draft, November 1983.

4. Doeblin, Ernest O., "Measurement Systems: Application and Design", McGraw-Hill Book Co., New York, NY, 1966.

5. "Report No. 83SYS0807-SS", Section 2.3, DSET Laboratories Inc., Phoenix, AZ, August 25, 1983.

6. "Chauffe-eau solaires domestiques (Transfert de chaleur liquide-liquide", F379-M1982, Association canadienne de normalisation, ISSN 0317-5669, août 1982.

7. "Calcul d'un facteur de correction des courbes de performance d'un capteur en fonction des variations du débit et des caractéristiques du fluide caloporteur", Guide technique n° 3, Bureau des programmes solaires, Travaux publics Canada, juin 1982.

8. "WATSUN User's Manual" and program documentation, WATSUN 6.0, WATSUN User Service, Waterloo, Ont., June 1984.